Physikalische Grundlagen der Medizin

Neue Versuche zur Verbesserung der Tiefendosistabellen in der Röntgen-Therapie

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

genehmigt

von der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt von

Walter Lohmann

aus Oberhausen (Rheinland)

1938

Druckerei und Verlag wissenschaftl. Werke Konrad Triltsch, Würzburg

Berichterstatter:

1. Prof. Dr. L. Grebe.

2. Priv.-Doz. Dr. W. Schmitz.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Einführung.

Der Röntgenarzt führt seine Bestrahlungen häufig unter Benutzung sogenannter Tiefendosistabellen durch. Es sind dies Tafeln, welche den Intensitätsabfall von Röntgenstrahlen beim Durchdringen des menschlichen Körpers angeben (1). Unter der Voraussetzung einer genauen Kenntnis von der Art der verwendeten Strahlung und der Leistung der Anlage kann der Arzt die benötigten Einfallsenergien und Bestrahlungszeiten aus den Tabellen errechnen. Untersuchungen über die Brauchbarkeit ihrer Angaben für die Praxis und Vorschläge zu Verbesserungen bilden den Inhalt dieser Arbeit.

Es ist leider unmöglich, die Zahlenwerte der Tiefendosistabellen durch theoretisch-mathematische Berechnungen zu gewinnen, weil die Strahlen auf dem Wege von der erzeugenden Röntgenröhre bis zum Krankheitsherd im Körper den verschiedensten, unkontrollierbaren Einflüssen ausgesetzt sind. Schon beim Durchdringen der Röhrenwand erleiden sie eine Veränderung. Bei der Wechselwirkung mit Materie ist die Schwächung besonders bedeutungsvoll. Für unendlich dünne und homogene Strahlenbündel folgt sie einem Exponentialgesetz von der Form:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d} \tag{1}$$

Dabei bedeutet I die Intensität der geschwächten Strahlung, wobei wir unter der „Intensität" die Menge Strahlen verstehen wollen, die in der Zeiteinheit auf die Einheit der Fläche senkrecht zur Strahlrichtung auftrifft. I_0 gibt die Intensität vor dem Durchdringen einer Schichtdicke d an und μ ist eine Materialkonstante, der „Absorptionskoeffizient", welcher sich seinerseits additiv aus zwei Größen, dem „Streukoeffizienten σ" und dem „Koeffizienten der lichtelektrischen Absorption τ" zusammensetzt, sodaß Gleichung 1 genauer lauten müßte:

$$I = I_0 \cdot e^{-d \cdot (\sigma + \tau)} \tag{1a}$$

Wird der Vorgang der Schwächung schon kompliziert durch dieses Zusammenwirken zweier verschiedenartiger Erscheinungen, so ge-

stalten sich die Verhältnisse noch unübersichtlicher, weil die in der medizinischen Praxis verwendete Strahlung nicht einer einzigen Wellenlänge zugeordnet ist, sondern sich gesetzmäßig über ein großes Gebiet erstreckt, dessen kurzwellige Grenze durch die Duane-Hunt'sche Beziehung

$$\lambda_0 = \frac{12{,}34}{KV_{max}} \tag{2}$$

gegeben ist. Dabei stellen τ sowohl wie auch σ theoretisch nicht genau definierbare Funktionen der Wellenlänge der Strahlung dar. Durch genaue Versuche, die zur Aufstellung von empirischen Formeln führten, hat sich Richtmyer (2) besonders verdient gemacht. Er gab eine Gleichung für den Atom-Absorptionskoeffizienten an, aus dem man durch Umrechnen den Wert für τ erhält:

$$\tau = \varrho \cdot 0{,}0136 \cdot \frac{Z^4}{A} \cdot \lambda^3_m \tag{3}$$

Darin bedeutet Z die Ordnungszahl (Atomnummer), A das Atomgewicht des durchstrahlten Elementes von der Dichte ϱ und λ_m die mittlere Wellenlänge der Strahlung. Die Gleichung gilt in dem Bereiche $\lambda_k > \lambda_m > 0{,}1$ AE, wenn wir unter λ_k die Wellenlänge der K-Absorptionsgrenze des fraglichen Elementes verstehen. Bei Allen (3) findet man eine noch genauere Interpolationsformel für die Gesamtschwächung:

$$\mu = \varrho \cdot 0{,}0136 \cdot \frac{Z^4}{A} \cdot \lambda^{2{,}92} + \sigma \tag{3a}$$

Der Streukoeffizient σ ändert sich nur wenig mit der Wellenlänge, sodaß er seinen „klassischen Wert" 0,2 nur bei kurzen Wellen erheblich unterschreitet. Auch ihm kommt große Bedeutung zu, weil die Strahlenpyramiden, die der Arzt in Gestalt der sogenannten „Felder" auffallen läßt, stets räumlich erheblich ausgedehnt sind. Infolgedessen werden die aus den zentralen Teilen des Bündels abgestreuten Strahlen immer noch an der Wirkung beteiligt bleiben. Der Intensitätsverlust durch Ablenkung aus den peripheren Zonen wird durch Streuzusatz von den angrenzenden Gebieten her vermindert, wenn nicht gar ganz aufgewogen. Durch Zusammenwirken beider Erscheinungen findet man deshalb bei räumlich ausgedehnten Strahlungen die Energie stets größer, als nach dem Schwächungsgesetz zu erwarten wäre.

Die Absorption der Röntgenstrahlen ist eine atomare Eigenschaft, in Molekülen chemischer Verbindungen und in Substanz-Gemischen

setzt sie sich in bestimmter Weise aus den Absorptionen in den einzelnen Atomen zusammen. Da diese Tatsache beim Bau unseres Meßinstrumentes große Bedeutung gewinnen wird, müssen wir näher auf die Berechnung des „Z_{eff}" eingehen, welches dann an die Stelle des Z in Gleichung 3 bzw. 3a tritt. Unter der „effektiven Ordnungszahl Z_{eff}" eines Gemisches etc. wollen wir dabei die Ordnungszahl eines gedachten Elementes verstehen, welches den gleichen Massenabsorptionskoeffizienten für Röntgenstrahlen haben würde wie das Gemisch. Eine genaue Methode zur Berechnung dieses Z_{eff} gibt Miehlnickel (4):

$$(4) \qquad Z_{eff} = \sqrt{\frac{B}{2} + \sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + \left(\frac{K}{3}\right)^3}} + \sqrt{\frac{B}{2} - \sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + \left(\frac{K}{3}\right)^3}}$$

wenn $$B = \frac{g_1}{g} \cdot (Z_1^3 + KZ_1) + \frac{g_2}{g} \cdot (Z_2^3 + KZ_2) + \ldots .$$

Z_n bedeutet auch hier die Ordnungszahl des Elementes n und $\frac{g_n}{g}$ dessen relativen Gewichtsanteil. Durch den Faktor K gehen die Absorption und die Streuung in die Berechnung ein:

$$K = \frac{K\sigma}{K\tau \cdot \lambda^{2,92}}$$

Für $K\sigma$ und $K\tau$ sind die Koeffizienten des Absorptions- bezw. des Streugliedes aus der Allen'schen Formel 3a einzusetzen. Zum praktischen Gebrauch genügt oft eine einfachere Beziehung, welche die Schwächung nicht berücksichtigt:

$$(4a) \qquad Z_{eff} \sqrt{\frac{g_1 \cdot Z_1^3 + g_2 \cdot Z_2^3 + \ldots}{g_1 + g_2 + \ldots}}$$

Sie läßt sich besonders auf leichtatomige Stoffe mit Erfolg anwenden.

Vorstehende Überlegungen führen leicht zu der Erkenntnis, daß wir genötigt sein werden, unsere Dosierungstafeln auf rein experimenteller Basis durch Ausmessen jedes einzelnen Wertes zu gewinnen. Da der menschliche Körper nicht als Versuchsobjekt dienen kann, sind eine große Zahl von Arbeiten angefertigt worden, die das Auffinden eines geeigneten Ersatzstoffes zum Ziel hatten. Untersuchungen von Krönig und Friedrich (5) ergaben, daß für verschiedene Strahlenhärten das Wasser gleiche Absorptionsverhältnisse zeigte wie Fleisch. Dorneich (6), welcher genaueste Vergleiche mit weichfeuchtem Körpergewebe sowohl als auch mit Knochen und gasgefüllten Hohlräumen anstellte, erhielt Abweichungen von 4%. Auch Versuche über die Schwächungsverhältnisse bei frischen Leichen und Wasser, die Borell (7) durchführte, stimmen bis auf 3—5% überein. Die Reihe der

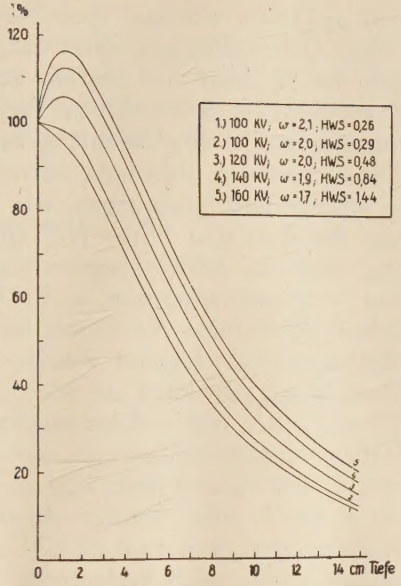
Untersuchungen mit gleich günstigen Ergebnissen könnte noch fortgesetzt werden (8, 9), sodaß uns in Wasser unzweifelhaft ein brauchbares Medium zur Verfügung steht, dessen Absorptionsverhältnisse den im Mittel beim Menschen auftretenden in genügender Annäherung parallel gehen.

Die Charakterisierung der Qualität einer Strahlung.

Die Wirkung, welche eine Röntgenbestrahlung auf den menschlichen Körper ausübt, hängt neben biologischen Faktoren, wie Art und Zustand der betroffenen Gewebe (10), in hohem Maße ab von zeitlicher und räumlicher Dosiverteilung sowie von der Zusammensetzung der angewandten Strahlung. Zwar steht ein Teil der Forscher heute auf dem Standpunkte, daß die Schädigung lebender Zellen in weitem Bereich technischer Röntgenstrahlen von der Wellenlänge unabhängig ist. Selbst, wenn danach also die Wirkung einer Bestrahlung dem Elektronenumsatz proportional wäre und es nur auf die im Körper absorbierte Energie, die „physikalische Dosis" ankäme, folgte aus dieser Erkenntnis unmittelbar bereits die Forderung nach einer eindeutigen Charakterisierung der Strahlenqualität, weil ja die Schwächung von den Eigenschaften der Röntgenstrahlung entscheidend abhängt.

Wie sich verschiedene Strahlenqualitäten in der Praxis verhalten, veranschaulicht Figur 1, welche die Intensitätsverhältnisse im Zentralstrahl beim Durchdringen einer 15 cm dicken Wasserschicht zeigt. Die eingezeichneten fünf Kurven sind wahllos aus der Menge der unter später zu besprechenden Umständen aufgenommenen herausgegriffen und besitzen von 1 bis 5 immer wachsende Härte. Die dadurch bedingte verschieden starke Absorbierbarkeit der Energie ist deutlich zu erkennen. Bei inhomogenen Strahlen erfolgt schon in den ersten Zentimetern Wassertiefe ein Intensitätsabfall durch das Überwiegen der Absorption, wohingegen bei homogeneren Strahlen infolge der prozentual viel stärker vertretenen kurzen Wellen die Streuung einen solchen Einfluß erlangt, daß sie nicht nur die Schwächung ausgleicht, sondern darüber hinaus sogar in den ersten Zentimetern Gewebe einen etwa 20 prozentigen Zusatz von Energie liefern kann.

Man ist seit langem bestrebt, Größen ausfindig zu machen, durch die eine Strahlung in ihren wesentlichen Eigenschaften eindeutig gekennzeichnet wird. Früher benutzte man gern die sogenannte „Halb-



Figur 1.

wertschicht" (= HWS) als Qualitätsmaß. Sie nennt uns die Materialdicke, welche die Intensität der zu charakterisierenden Strahlung auf die Hälfte ihres Ausgangswertes herabsetzt. Formelmäßig läßt sich folgende einfache Beziehung ableiten: Schreiben wir Gleichung 1 in logarithmischer Form:

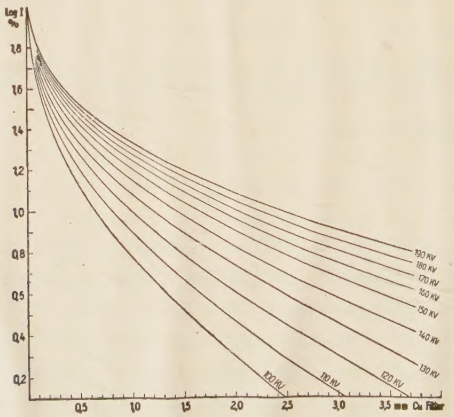
$$\text{In}\,\frac{I_0}{I} = d \cdot \mu \tag{5}$$

und setzen als Materialdicke d die HWS ein, so wird lt. Definition $\frac{I_0}{I} = 2$ und es ergibt sich

$$HWS_{cm} = \frac{\text{In}\,2}{\mu} \tag{6}$$

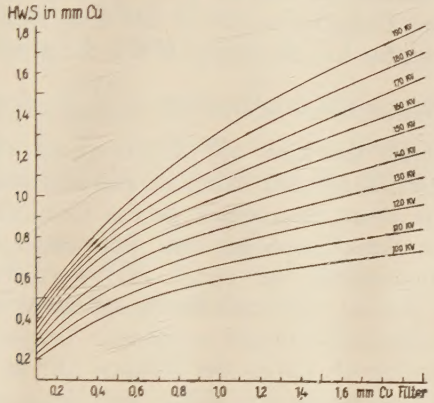
Da diese Größe recht anschaulich und leicht reproduzierbar ist, konnte sie als erstes einigermaßen geeignetes Homogenitätsmaß große Bedeutung in der Praxis erlangen und findet sich auch heute noch in den Dosierungstafeln zur Charakterisierung der Strahlen. Höheren Anforderungen kann die HWS aber nur in Verbindung mit einem weiteren, geeigneten Faktor genügen. Die Probleme und Schwierigkeiten, die bei der HWS-Ermittelung auftreten, sind schon von Mat-

thes (11) ausführlich diskutiert worden. Eine Neubestimmung vor Beginn der eigentlichen Untersuchungen schien ratsam, weil die Erzeugungsbedingungen der Strahlen von Einfluß auf die Größe der HWS sind. Auch verschiedene Röhrentypen variieren den Wert, denn die Veränderungen, welche eine Strahlung beim Durchdringen des Röhrenglases erleidet, können nicht unberücksichtigt bleiben. Sie sind bei technischen Röhren und Spannungen, wie wir sie benutzen, einer Mitteilung von Behnken und Nitka (12) zufolge nicht mehr bestimmt anzugeben, weil das Schwächungsvermögen des Röhrenkolbens zu dem von Vergleichssubstanzen, z. B. Aluminium, oberhalb 31 KV in keinem konstanten Verhältnis mehr steht. Einem Vorschlag von H. Th. Meyer (13) folgend, wurden die Werte für die HWS auf graphischem Wege gewonnen aus Schwächungskurven, die von 100 bis 190 KV in 10 KV Abstand aufgenommen wurden, und zwar unter den gleichen Versuchsbedingungen, die später ausführlich zu erörtern sein werden. Wie Figur 2 zeigt, sind bei ihrer Darstellung nicht die Werte I in % von I_0 selbst, sondern deren Logarithmen als Ordinaten aufgetragen worden, weil nach dieser Umformung die bei einer Homogenstrahlung exponentiell verlaufende Absorptionskurve die Gestalt einer Geraden annimmt. Zwar finden wir diese Kurvenform bei der von uns erzeugten technischen Strahlung nicht verwirklicht, weil infolge ihrer Inhomogenität und der daher einsetzenden homogenisierenden Wirkung der Filter der Schwächungskoeffizient μ nicht konstant ist, sondern mit zunehmender Filterung kleiner wird. Jedoch bietet diese Methode der Darstellung trotzdem den großen



Figur 2.

Vorteil, daß man mit ihrer Hilfe eine Ablesegenauigkeit erreichen kann, die bei einer annähernd exponentiell verlaufenden Kurve sich nie würde erzielen lassen. Die Ergebnisse, welche beim Auswerten der eben besprochenen Kurvenschar erzielt wurden, sind dem Bild 3 zu entnehmen. Genaue Werte wurden in einer Tabelle der Arbeit angefügt.

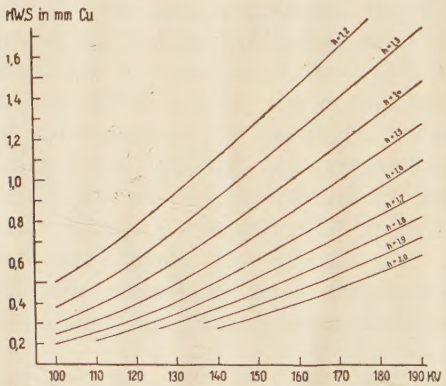


Figur 3.

Holthusen (14) hatte bereits darauf hingewiesen, daß die bloße Angabe der HWS zur Charakterisierung der Qualität einer Strahlung unzulänglich ist (siehe auch (15)), und in der Matthes'schen Untersuchung kommt klar zum Ausdruck, wie verschiedenartig in ihrer Homogenität Strahlungen mit gleicher HWS sein können. Sie würdigt in ihrer Arbeit eingehend die bedeutendsten Versuche, die geeignet erscheinen konnten, das Problem einer befriedigenden Lösung entgegenzuführen. Es sind Vorschläge, die sich an die Namen H. Th. Meyer, Jakobi-Liechti, Schwarzschild, Quimby, Christen und Holthusen knüpfen. Die meisten von ihnen können aber heute, teils wegen der Ungenauigkeit ihrer Ergebnisse, teils durch Anwendung zu komplizierter Rechenoperationen, nur noch historisches Interesse beanspruchen.

Erst im Jahre 1937 legte man allgemein ein bestimmtes Qualitätsmaß fest. Man kam dabei zurück auf einen Vorschlag Christens (16) aus dem Jahre 1915. Seine Methode hat den anderen, ebenso einwandfreien gegenüber den Vorzug besonders einfacher Durchführbarkeit, weil sie eine Qualitätsbestimmung allein aus der Beobachtung des wirksamen Strahlungsbündels ermöglicht, ohne daß eine

Berücksichtigung der Betriebsbedingungen der Apparatur notwendig wäre. Christen benutzt als eindeutiges Qualitätsmaß die Änderung der Größe der HWS einer Strahlung, wie sie bei fortschreitender Filterung eintritt. Hat man so z. B. die HWS hinter einem Filter 1 gemessen und unterwirft die derart vorbehandelte Strahlung einer weiteren Filterung durch ein Filter 2, welches ihre Intensität wieder auf die Hälfte schwächen soll, so wird im allgemeinen das zweite Filter eine größere Dicke aufweisen als das erste und nur im Fall einwelligen Röntgenlichts hat die zweite HWS die gleiche Dicke wie die erste. Christen führte für den Quotienten $\frac{HWS_2}{HWS_1}$ den Buchstaben „h" ein und bezeichnete ihn kurz als „Homogenitätsmaß". Der Mindestwert, den h annehmen kann, ist also eins und je mehr es sich von ihm entfernt, desto heterogener ist das Gemisch, das es vertritt. Wir können aus derselben Schar von Schwächungskurven, die als Figur 2 eine Ermittelung der ersten Halbwertschichten gestattete, auch die HWS_2 ablesen, also auch den Quotienten, eben das gesuchte h, ohne weitere Zusatzmessungen errechnen. Tragen wir die Punkte gleicher Homogenität als Linien des gleichen „h" in ihrer Abhängigkeit vom Filter, oder besser von HWS_1 und Spannung auf, dann erhalten wir die Kurvenschar 4, die für unsere späteren Versuche noch große Bedeutung erlangen wird.



Figur 4.

Außerordentlicher Dank gebührt Herrn Prof. Dr. Grebe, dem Leiter des Bonner Röntgenforschungs-Instituts, daß er anregte, unter Benutzung dieses neuen Qualitätsmaßes die Grundlagen für Dosie-

rungstafeln zu schaffen, welche in der Lage sind, viel genauere Daten anzugeben, als das bei einer Charakterisierung durch die HWS allein bisher möglich war.

Es ist zu erwähnen, daß es noch eine einfache Methode gibt, um eine Röntgenstrahlung einwandfrei zu charakterisieren. Sie wurde von Holthusen (14) ausgearbeitet und benutzt das Verhältnis der mittleren zur kürzesten Wellenlänge eines Strahlengemisches, den „Inhomogenitätsfaktor" ω:

$$\omega = \frac{\lambda_m}{\lambda_0}, \tag{7}$$

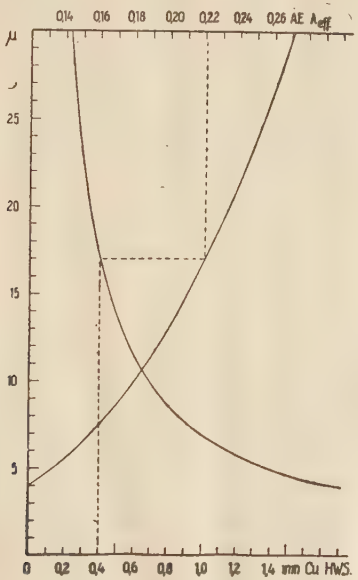
Auch hier geht das alte Maß der HWS, verbunden mit anderen, geeigneten Faktoren in die Rechnung ein. λ_m kann nämlich aus der schon bekannten Richtmyer'schen Formel auf dem Umweg über μ erhalten werden:

$$\lambda_m = \sqrt[3]{\frac{(\mu - \sigma) \cdot A}{\varrho \cdot Z^4 \cdot 0{,}0136}} \tag{8}$$

μ folgt, wie wir sahen, der Beziehung (6):

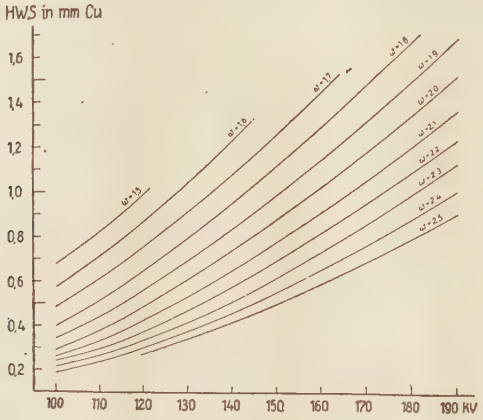
$$\mu = \frac{\ln 2}{HWS_{cm}}$$

so daß die Errechnung von λ_m letzten Endes auf eine Ermittelung der HWS zurückgeführt werden kann. Mit Hilfe der Kurven 5, die



Figur 5.

nach zahlenmäßiger Auswertung der Formeln 6 und 8 für Cu angefertigt wurden, ist es sogar möglich, rein mechanisch zu jeder HWS die zugehörige λ_m aufzufinden. λ_0 erhält man aus der Beziehung (2). Ähnlich wie in Figur 4 für h können wir auch für ω die Kurven gleicher Homogenitäten mit HWS als Ordinate und Spannung als Abszisse eintragen. Wir erhalten dann Bild 6, welches in ähnlicher



Figur 6.

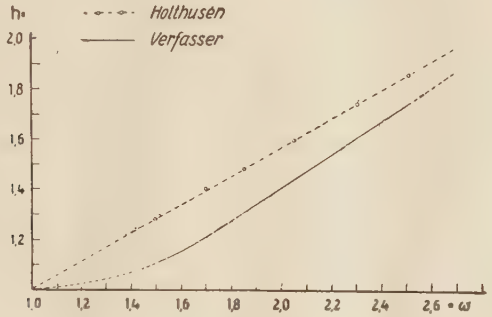
Form bekannt ist aus der Arbeit von Matthes, die dieses Qualitätsmaß zu Grunde legte.

Eine Gegenüberstellung beider Homogenitätsmaße war notwendig, um zu entscheiden, ob zwischen h und ω eine bestimmte Beziehung besteht und welcher Art sie ist. Holthusen (17) spricht sich für das Vorhandensein einer solchen aus und Zakovsky (18) gibt sogar ein experimentell ermitteltes Formelpaar an, welches gestatten soll, das eine Maß in das andere umzurechnen:

$$\omega = 1 + \frac{16}{9} \cdot (h - 1) \quad \text{oder} \quad h = 1 + \frac{9}{16}(\omega - 1) \tag{9}$$

Matthes andererseits sah keine so einfache Überführungsmöglichkeit. Die vorliegende Nachprüfung ergab, daß h und ω zweifellos keine von einander unabhängigen Größen sind. Wie ein Vergleich der Bilder 4 und 6 zeigt, verlaufen die Kurvenscharen vollkommen parallel, sodaß die Behauptung Holthusens bestätigt wird. Auf den Kurven gleichen h's ist auch ω konstant und umgekehrt. Allerdings ergaben die hier ausgeführten Messungen in dem untersuchten Bereich zwischen h = 1,1 und h = 1,8 Werte für das jeweils zuge-

ordnete ω, die unter den von Holthusen angegebenen liegen, wie Figur 7, eine kurvenmäßige Darstellung der Beziehungen zwischen h und ω, zeigt. Man erkennt, daß die Abweichungen bei inhomogenen Strahlen am kleinsten sind, während auf der anderen Seite der Kurve die Größe h sich dem Wert eins langsamer nähert als ω. Dies heißt, daß bei fortschreitender Homogenisierung sehr harter Strahlen die



Figur 7.

Größe zweier aufeinander folgender Halbwertschichten nicht mehr wesentlich verschieden ist, während die mittlere Wellenlänge des Gemisches von dessen kurzwelliger Grenze noch erheblich entfernt sein kann. Vielleicht dürfte der eigenartige Verlauf der Kurve im Bereich homogener Strahlen durch den Einfluß der Lage des Maximums in der spektralen Verteilungskurve der Röntgenenergie seine natürliche Erklärung finden. Die Unterlagen zu der Holthusen'schen Kurve sind den schon erwähnten Aufsätzen (14) und (18) entnommen.

Die Versuchsanordnungen.

a.) Hochspannungsanlage, Filter, Phantom.

Eine Siemens Stabilivolt-Anlage lieferte die benötigten Spannungen zwischen 100 und 190 KV. Sie wurden primärseitig einreguliert und konnten sekundär durch eine Kugelfunkenstrecke geprüft werden. Ferner war im Hochspannungskreis ein elektrostatisches Voltmeter System Starke-Schroeder angeschlossen. Dieses diente zum Erkennen sekundärseitiger Spannungsänderungen, die sich im Primärkreis nicht bemerkbar zu machen brauchen und die z. B. durch wachsende Sprühverluste nach längerer Betriebsdauer auftreten können. Zur Erzeugung der Röntgenstrahlen wurde eine AEG-Therapieröhre mit Wolfram-Antikathode benutzt. Ihr Brennfleck lag 66,5 cm hinter dem 64 · 64 mm großen Fenster der Blei-Schutzwand. Die Filter waren leicht auswechselbar 72 cm vom Focus entfernt angebracht. Sie bestanden aus Folien reinsten Elektrolyt-Kupfers von genau festgelegten Flächenausmaßen, so daß die Dicke durch Wägung leicht mit der erforderlichen Präzision bestimmbar war. Um die nötige Anzahl Meßpunkte zu erhalten, wurden bei jeder Serie die Werte aufgenommen, welche ein Filtersatz von folgenden Dickenabstufungen lieferte:

0 mm Cu	0,555 mm Cu	1,542 mm Cu
0,112 mm Cu	0,779 mm Cu	1,766 mm Cu
0,224 mm Cu	0,987 mm Cu	1,992 mm Cu
0,336 mm Cu	1,211 mm Cu	

Für die früher schon besprochenen Messungen in Luft kommen außerdem noch hinzu die Stärken:

2,216 mm Cu	2,979 mm Cu	3,984 mm Cu
2,547 mm Cu	3,534 mm Cu	

Von der Verwendung eines Zusatzfilters aus Aluminium oder Cellophan (nach Küstner (19)) zur Absorption der Sekundärstrahlung des Kupfers wurde abgesehen, um eine Beeinflussung des Meßergebnisses zu vermeiden. Außerdem soll nach Grunberg und Johner (20)

bei 180 KV der Anteil der Kupfer-K-Fluoreszenzstrahlung an der Gesamtstrahlung 2 ‰ nicht übersteigen. Trotzdem wurde, um ganz sicher zu gehen, das Meßgerät 18 cm von den Filtern entfernt aufgestellt. Bei dieser Anordnung ergab sich ein Fokus-Haut-Abstand von 90 cm und ein Einfallsfeld von 75 cm². Die Angaben sämtlicher im Anhang angefügter Tabellen beziehen sich auf diese Größen. Zahlreiche Hinweise in der Literatur dürften jedoch eine Umrechnung der Zahlen für andere Verhältnisse ermöglichen. Es sei hierzu nur kurz folgendes erwähnt: Die Nutzdosis, das ist der Quotient aus der Tiefendosis und der Oberflächendosis, wird, unveränderte Betriebsbedingungen vorausgesetzt, umso größer, je größer der Focus-Haut-Abstand ist. Nach Friedrich und Körner (21) ist die Abhängigkeit der ND vom FH für kleine (2 · 2 cm) und große Felder (20 · 20 cm) verschieden, sie wächst mit der Feldgröße. Eine Erklärung für diese Erscheinung ist im Buche von Holthusen (22) nachzulesen. Dort wird auch verdeutlicht, warum nicht nur eine Vergrößerung des FH bei gleichbleibendem Einfallsfeld, sondern auch umgekehrt eine Erweiterung der Eintrittsöffnung bei festgehaltenem Röhrenabstand zu einem Ansteigen der Nutzdosis führt.

In dem erwähnten FH = 90 cm lag bei den Messungen die vordere Längswand des „Gewebe-Ersatz-Stoffes", einer mit Wasser gefüllten Celluloidwanne von den Dimensionen 30 · 30 · 20 cm, welche durch diese Ausmaße die Gewähr bot für das vollständige Erfassen der gesamten Streustrahlung. Die Temperaturschwankungen des horizontal durchstrahlten Mediums hatten zwischen 10° und 45° auf die Messungen keinen Einfluß, wie Vorversuche bewiesen. Auf genau waagerechten Verlauf des Strahlenbündels im Wasser wurde Wert gelegt, um eine Inkonstanz der Strahlungsintensität zu vermeiden, welche nach Rajewsky (23) sonst durch sprunghafte Wanderung des Brennflecks der Röhre auftreten kann. Außerdem würde bei schief durchsetzendem Bündel die Gefahr bestanden haben, daß das Meßgerät, welches in immer gleicher Wassertiefe das Phantom von vorn nach hinten abtastete, sich aus dem Zentralstrahl entfernt hätte.

b.) Das Meßgerät.

Die moderne Dosimetrie basiert auf der Tatsache, daß bei jeder Absorption von Röntgenstrahlenenergie Elektronen frei werden und damit eine Jonisation, ein Leitendwerden der umgebenen Luft verbunden ist. Setzt man ein solches, wohl definiertes Luftvolumen in

Gestalt einer Jonisationskammer der Wirkung eines elektrischen Feldes aus, das stark genug ist, um sämtliche gebildeten Jonen zu erfassen, so wird ein Strom unter dem Einfluß der Röntgenbestrahlung entstehen, welcher ihrer Intensität streng proportional ist. Dabei ist zu fordern, daß die Jonisationskammer in dem Bereich, in dem sie benutzt werden soll, für Strahlen verschiedenster Qualitäten gleich empfindlich ist. Die Einheit 1 Röntgen muß in ihr stets die gleiche Jonisierung hervorrufen, gleichgültig, ob die Strahlen beispielsweise von 100 KV erzeugt wurden oder von 180 KV und dabei vielleicht noch durch einige mm Kupfer erhärteten. Diese Eigenschaft der Wellenlängen-Unabhängigkeit besitzt eine Kleinkammer deshalb nicht ohne weiteres, weil bei ihr nie vermieden werden kann, daß die erzeugten Luftionen mit der Wand in Wechselwirkung treten. Der Vorgang wird nur dann bedeutungslos, wenn die Wand aus einem Material besteht, welches die gleichen Eigenschaften der Schwächung zeigt, wie Luft. Miehlnickel (24) und andere (25) haben die effektive Ordnungszahl für Luft nach der Formel 4 berechnet und erhielten $Z_{eff} = 7{,}69$. Sie sprechen den gleichen Wert auch einem Gemisch von 97% C und 3% Si zu, das nach dem Gesagten ein geeigneter Stoff zum Bau einer luftäquivalenten Kammerwand sein müßte. In Wirklichkeit liegen die Verhältnisse noch etwas komplizierter, weil die Absorption eines Stoffes eine Funktion der Wellenlänge der absorbierten Strahlung ist. Es genügt nicht, wenn das Luftäquivalent die gleiche Z_{eff} besitzt, sondern man muß vielmehr fordern, daß in dem entsprechenden Bereich die Absorption den gleichen Gang mit der Wellenlänge zeigt wie die von Luft.

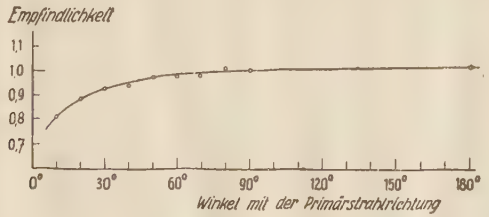
Für die Messungen dieser Arbeit wurde eine besondere, luftäquivalente Kleinkammer aus vorgenannten Stoffen konstruiert. Es zeigte sich, daß die Forderung nach Wellenlängen-Unabhängigkeit am schwersten zu erfüllen war. Trotz Verwendung reinen Graphits hatte dessen Herkunft großen Einfluß auf seine absorbierenden Eigenschaften. Eine Rückfrage bei der Lieferfirma ergab, daß der ermittelte Aschegehalt bei gleicher Ware zeitlichen Schwankungen zwischen 1,5 und 20% unterworfen ist. Zum Gebrauch wurde das Luftwändematerial mit Trolitul-Benzol-Lösung als Bindemittel bis zu sirupartiger Zähflüssigkeit vermengt und als feiner Überzug auf die Innenwand von Celluloidbällchen aufgetragen. Dieser Wandbelag, der die eine Elektrode beim Anlegen des Feldes bildet, überzog aus gleicher Masse auch die Oberfläche des Stiels. Er bestand ebenfalls aus einem Celluloidrohr, um so die Strahlen, welche fast in Stielrichtung einfielen, nicht zu beeinflussen. Andererseits mußte dafür

gesorgt werden, daß der Träger nicht durch Ionisierung einen Beitrag zu dem Strom der Kugelkammer lieferte. Deshalb wurde er mit Kolophonium ausgegossen, einem Harz, welches bei hoher Isolierfähigkeit keine nennenswerte Ionisierbarkeit aufweist. Die Einflußlosigkeit des Stieles ließ sich durch Bestrahlen unter gleichzeitigem Abschirmen der Kammer bestätigen. Die Prüfung der Kammern geschah durch Vergleich mit einem Küstner'schen Eichstandgerät bei folgenden Strahlenqualitäten:

100 KV, 0,1 mm Cu	150 KV, 1,2 mm Cu
110 KV, 0,3 mm Cu	160 KV, 1,7 mm Cu
120 KV, 0,6 mm Cu	170 KV, 2,0 mm Cu
130 KV, 0,8 mm Cu	180 KV, 2,5 mm Cu.
140 KV, 1,1 mm Cu	

Die nach obigen Angaben gebaute Kammer war in dem genannten Bereich stets gleich empfindlich.

Eine Kugelform wurde für die Kleinkammer gewählt, damit sie für Strahlen aus verschiedensten Richtungen möglichst gleich empfindlich wurde und auch die Rückstreuung in ihrer vollen Größe erfassen konnte. Wieweit durch Form und Stielmaterial Richtungsunabhängigkeit erzielt wurde, zeigt Figur 8, die allerdings unter erheblich ungünstigeren Bedingungen aufgenommen werden mußte, als sie in der Praxis gegeben sind. Die Kammer mit Stiel war in etwa 12 cm Höhe an ein rechtwinklig gebogenes Metallrohr angeschraubt, welches die Verbindung mit dem Elektrometer vermittelte. Normalerweise hing das Instrument senkrecht herab, wie aus Bild 11 hervorgeht, sodaß also die Längsachse der Kammer mit der Richtung der Primärstrahlen einen Winkel von 90° bildete. Zur Aufnahme von Kurve 8 wurde der Kammerstiel in einem Vollkreis um seine Längsachse gedreht, dabei blieb die Kugelkammer selbst stets an der gleichen Stelle des Raumes, die durch ein Fadenkreuz markiert war. Die von der Röhre kommende Strahlung mußte also in der Stellung „0°" das Metall-Ansatzrohr in seiner Längsachse



Figur 8.

durchsetzen und konnte daher das Meßgerät kaum treffen. Trotzdem zeigt die Kammer bei diesem Versuch nach einer Drehung um 20° bereits $^9/_{10}$ ihrer normalen Empfindlichkeit. Im praktischen Betrieb liegen die Verhältnisse deshalb wesentlich günstiger, weil es sich dann darum handelt, auf Strahlungen zu reagieren, die durch mehrfache Rückstreuung im Gewebe die Richtung der Kammerlängsachse erhalten haben. Diese brauchen aber keine Metallteile zu passieren, weil das Gerät, soweit es in das Wasser reicht, aus leichtatomigen Stoffen gebaut ist.

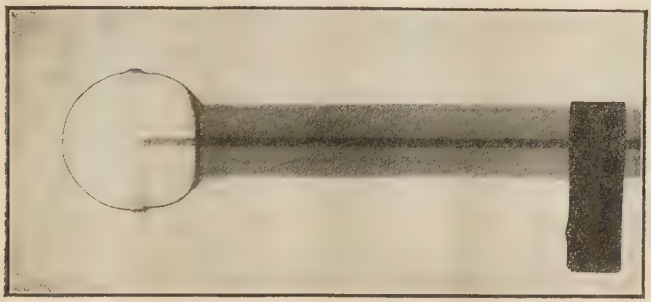
Glocker und Kaupp (26) rügen den Verschleierungs-Effekt als Fehler der Kleinkammer. Es ist infolge ihrer Ausdehnung nicht möglich, Dosisänderungen auf geringe Entfernungen zu erfassen. Daher strebte man zunächst nach möglichst kleinen Dimensionen und verarbeitete Celluloidbällchen von 15 mm Durchmesser an zu Kugelkammern. Es zeigte sich jedoch, daß ihre Empfindlichkeit sehr stark mit der Größe des ionisierten Luftvolumens abnahm, sodaß es nicht ratsam erschien, eine Größe von 25 mm zu unterschreiten. Trotz dieses Durchmessers war das Instrument noch in der Lage, ein Auflösungsvermögen in der Größe des in Bild 1 gezeigten zu liefern, besonders, da sprunghafte Änderungen der Intensitätsverhältnisse im Phantom nicht zu erwarten waren. Die Meßpunkte, die durch Verbinden jene Kurven wie auch alle später zu besprechenden ergaben, lagen wie folgt durch die Wasserschicht verteilt:

0 mm Tiefe	80 mm Tiefe
12,5 mm Tiefe	100 mm Tiefe
25,0 mm Tiefe	125 mm Tiefe
40,0 mm Tiefe	150 mm Tiefe.
60,0 mm Tiefe	

Die Abstände sind auf die Mitte der Kammer bezogen.

Die Messung der Oberflächen-Intensität kann auf verschiedene Arten erfolgen, je nachdem, ob man sie mit der wasserberührenden, halb- oder ganzeingetauchten Kammer vornehmen will. Natürlich ist dieser „Lage-Effekt" nicht ohne Einfluß auf die Zahlenwerte der Tiefendosistafeln. Gewöhnlich bezog man ihre Angaben auf die halbeingetauchte, die „Kammerlage II", obwohl in der Praxis eine derartige Messung der Einfallsstrahlung nicht möglich ist. In der Literatur wurde daher schon lange die Körper-berührende Stellung I des Instrumentes für Bezugsmessungen gefordert (Vergl. (6, 23, 27)). Die hier veröffentlichten Meßreihen dürften die ersten sein, welche die natürliche Kammerlage I benutzen.

Das Röntgenbild 9 der eben besprochenen Ionisationskammer soll einen Eindruck von ihrem inneren Aufbau vermitteln. Durch Herausarbeiten größtmöglicher Schärfen sind sowohl die Celluloidkugel mit ihrem gleichmäßig feinen Belag wie auch der bestrichene Celluloid-Kolophonium-Stiel in allen Einzelheiten zu erkennen. Das stark absorbierende Metallstück am Ende des Trägers stellt eine Messingschelle dar, über welche der Kammer die Sättigungsspannung zugeführt wurde. Der ebenfalls sichtbare, zentral durchlaufende Stift aus

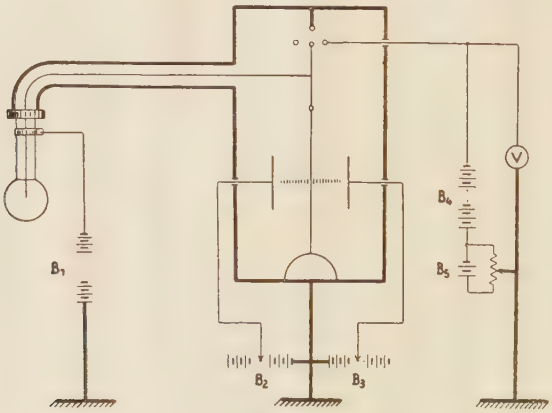


Figur 9.
40 KV ungefiltert; Schleußner „Doneo"-Röntgenfilm.

Graphit bildet die andere Elektrode. Er durchzieht auch das schon erwähnte Metallrohr, von dem er durch Kolophonium-Ausguß isoliert ist und verbindet die Kammer so mit dem 65 cm entfernt stehenden Meßgerät. Der spannungsführende Stiel hingegen ist gegen das geerdete Verbindungsrohr isoliert.

Die bei Bestrahlung der Ionisationskammer auftretende Ladung wurde durch ein Wulf'sches Einfaden-Elektrometer nach der Auflauf-Methode registriert. Der Schaltplan Figur 10 zeigt zunächst die Batterie B_1, welche mit einer Spannung von 700 Volt stets das Fließen des Sättigungsstromes in der Kammer gewährleistete. Die aus Anodenbatterien bestehenden Spannungsquellen B_2 und B_3 dienten der Regulierung der Empfindlichkeit des Systems durch Verändern der Hilfsspannung an den Schneiden. Bei der höchsten benötigten Empfindlichkeit von 0,5 Volt pro Skalenteil lagen je 120 Volt Spannung an den Schneiden, deren gegenseitiger Abstand zur Vermeidung von Kapazitätsänderungen des Systems nicht verändert wurde. Ebenso blieb die Fadenspannung immer die gleiche. Sie war so eingestellt, daß bei geerdeter rechter Schneide und ebenfalls geerdetem Faden dieser um 50 Skalenteile ausschlug, wenn die linke Schneide, die sich

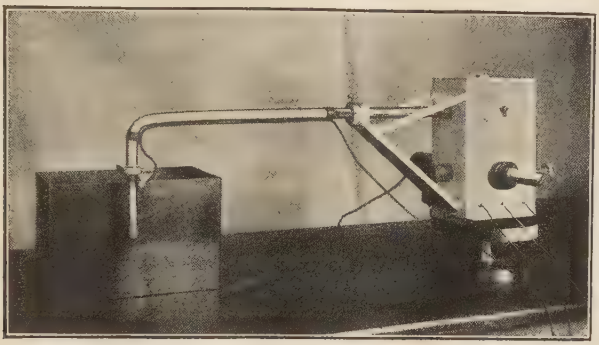
im Abstand von 15 mm befand, eine Spannung von 590 Volt erhielt. B_4 und B_5 gestatteten die Kontrolle der eingestellten Empfindlichkeit und ein Siemens-Normalinstrument V zeigte an, wie groß die Spannung war, welche an dem Faden einen Ausschlag von einer bestimmten Anzahl Skalenteilen hervorrief. Die Prüfspannung V wurde dabei durch einen eingebauten Umschalter, der bei Nichtgebrauch das System erdete, an den Faden gelegt. Zum Messen der Ionisierung konnte dieser Schalter ganz von dem Elektrometer abgetrennt werden, damit er an der empfindlichen Apparatur keine Störungen auslösen konnte. Das ganze System war aus dem gleichen Grunde von der Außenwelt durch eine geerdete Bleihülle getrennt, alle in Figur 10 dick eingezeichneten Leitungen waren mit ihr verbunden. Zur Isolation des Instrumentes wurde außer dem Kolophonium nur Bernstein und Trolitul verwendet. Erreicht wurde durch diese Vorsichtsmaßnahmen, daß einerseits Isolationsverluste nicht auftraten, andererseits konnte auch das Eindringen vagabundierender Streustrahlung in das weit vom Primärstrahlbündel entfernt aufgestellte Elektrometer ganz vermieden werden, sodaß ein merklicher Dunkelablauf nicht beobachtbar war. Das Äußere des mit Aluminium verkleideten In-



Figur 10.

strumentes auf seinem drehbaren Sockel und der Kammer an dem langen Ausleger gibt das Bild 11 wieder. Man erkennt an der Vorderwand das noch besonders in Blei gelagerte Ablesemikroskop, welches durch eine Punktlampe von hinten stets gleich beleuchtet war und darunter die Anschlüsse zu den Schneiden im Inneren, deren seitlich herausragende Stellknöpfe ebenfalls Bleikappen tragen. Der Be-

dienungsknopf des Umschalters ist über dem Tubus sichtbar. Ebenso fällt die Stellschraube am Verbindungsrohr auf, welche den um seine Achse drehbaren Ausleger an jeder Marke sicher festhielt.



Figur 11.

c.) Meßmethodik.

Mit vorstehend beschriebener Apparatur wurden bei 100, 120, 140, 160 und 180 KV_{max} Schwächungsmessungen am Phantom ausgeführt. An jedem der neun aufgezählten Tiefenpunkte ist dabei die Wirkung eines jeden der vorerwähnten elf Filter beobachtet worden. Da alle in die Kurven eingetragenen Meßpunkte ihrerseits Mittel aus 10 Einzelablesungen darstellen, liegen den Tiefendosistabellen also rund 5000 Messungen zu Grunde. Sie bestanden in einem Abstoppen der Zeiten, welche der Faden des Elektrometers brauchte, um infolge seiner Aufladung über 10 Teilstriche des Meßokulars zu wandern. Die Empfindlichkeit des Instrumentes war so einreguliert, daß diese Bewegung sich innerhalb 2 Minuten vollzog. Größere Ungenauigkeiten, die sich gelegentlich während der Arbeit bemerkbar machten, ließen sich auf ungleichmäßige Stromzufuhr zurückführen. Ein Arbeiten in den Zeiten größter Belastungsschwankungen des Netzes wurde daher tunlichst vermieden. Einer Anregung von Trossel (28) zufolge fand längere Zeit hindurch eine Kontrolle der Luftfeuchtigkeit statt, ein gesetzmäßiger Einfluß war aber, vielleicht wegen der ständigen Trockenhaltung des Gerätes durch Chlorkalzium, nicht feststellbar.

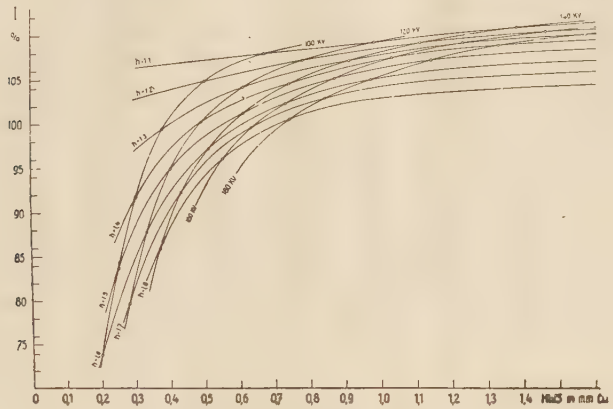
Ergebnisse.

Die Resultate der Halbwertschicht-Messungen, die Kurven der gleichen h und gleichen ω, sowie die graphische Darstellung der Beziehungen zwischen beiden sind früher bereits besprochen worden. Wie dort geht man auch zur Ermittelung von Tiefendosen wieder von Schwächungskurven aus. Für alle benutzten Spannungen wurden Scharen solcher Kurven gezeichnet, die äußerlich der Figur 2 ähneln, sich aber von ihr dadurch unterscheiden, daß die gestreckter verlaufenden Kurven stets der gleichen Erzeugungsspannung angehören und nur größeren Wassertiefen und deren homogenisierender Wirkung entsprechen. Sowohl diese Zeichnungen wie auch solche von Kurven gleicher Filterung in Abhängigkeit von der Spannung dienten dazu, um die Brauchbarkeit der Meßergebnisse an der Möglichkeit einer gesetzmäßigen Einordnung der Punkte zu beurteilen. Vervollständigt wird die Kontrolle durch eine Auswertung gemäß Figur 12. Dort

Figur 12.

erscheinen die Nutzdosen der Strahlung in den betrachteten Tiefen. Das Bild zeigt für das Beispiel von 120 KV, daß die in Prozenten der Oberflächenintensität gemessene Tiefendosis die Ordinate und die

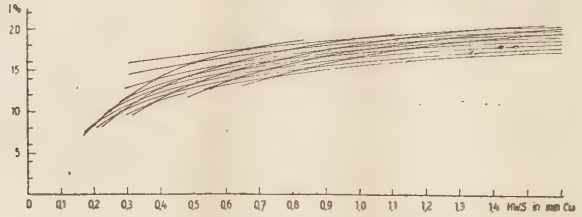
HWS die Abszisse dieses Systems bildet. Für jede verwendete Spannung ist eine solche Kurvenschar eingetragen worden. Mit ihrer Hilfe lassen sich die endgültigen Tafeln leicht aufstellen. Da nämlich das Homogenitätsmaß h in Verbindung mit einem weiteren Faktor, etwa der HWS, jede Strahlung unzweideutig charakterisiert, können wir die Abszisse der Figur 12 direkt in h einteilen. Es wird dann auf jeder der Kurven einen und nur einen Punkt geben, welcher beispielsweise einem h von 1,5 entspricht. Er kann aus Bild 4 abgelesen werden und gehört für unser Beispiel bei einer Strahlung von 120 KV zu einer HWS = 0,40 mm Cu. Ebenso werden die Strahlen aller anderen vorkommenden Qualitäten durch einen solchen bestimmten Punkt in ihrer Dosis auf der Kurve fixiert sein. Da wir gemäß unseren fünf Meßspannungen für jede Tiefe fünf Kurven analog denen in Bild 12 besitzen, können wir auch jeweils fünf Punkte gleicher Homogenität angeben, die wir dann durch eine „Kurve der gleichen h" verbinden. Den Verlauf der nach diesen Vor-



Figur 13.

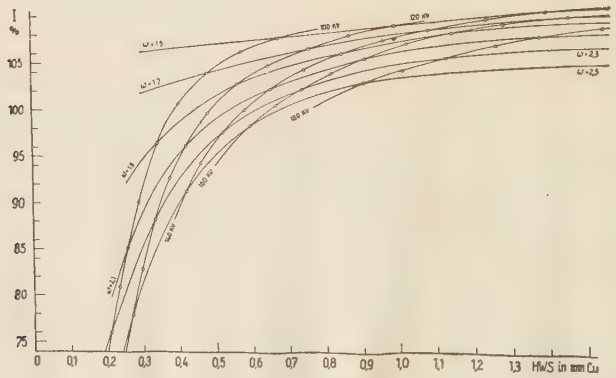
schriften gezogenen Kurven gleichen h's mögen die folgenden zwei Bilder für zwei willkürlich herausgegriffene Tiefen, Figur 13 für T = 25 mm und Figur 13a für T = 150 mm vorführen. Sie und alle fehlenden können mit Hilfe der im Anhang beigefügten Tiefendosistabellen leicht reproduziert werden. Bei beiden sind zunächst die fünf Schwächungskurven für 100, 120, 140, 160 und 180 KV, von denen wir die für 120 KV aus Bild 12 schon kennen, nochmals eingezeichnet und auf ihnen markiert erscheinen die Punkte, die den bestimmten Homogenitätsgraden h = 1,1 bis h = 1,8 entsprechen. Die

Punkte gleichen h's sind dann durch Kurven, auf denen die Qualität der Strahlung konstant ist, verbunden worden und mit der entsprechenden Bezeichnung versehen. Würde man anstatt des h den Inhomogenitätsfaktor ω als Maß benutzen, so erhielte man ganz ähnliche Kurven, wie Figur 14 für T = 25 mm zeigt. Sie ähneln in ihrem Verlaufe insofern denen, die Matthes für drei verschiedene Tiefen an Hand von Tabellen bespricht, als auch hier die homogenste Strah-



Figur 13a.

lung stets die größte Tiefenausbeute liefert, während mit Holthusen nur in Bereichen größerer Halbwertschichten eine Übereinstimmung besteht. Bei ihm schneiden sich sämtliche ω-Kurven bei einer bestimmten HWS, so daß nach seinem Ergebnis bei kleinen HWS zum Erreichen einer großen Tiefenausbeute die inhomogenere Strahlung vorzuziehen wäre. Ein solcher Kurvenverlauf war ebenso unwahrscheinlich wie die Unregelmäßigkeiten, die Matthes verbuchen mußte. Es zeigte sich bei ihr nämlich, daß von 0,6 mm HWS und $\omega = 2{,}0$ an und mit wachsender Homogenisierung immer ausgeprägter die Tiefendosiswerte nicht mehr dauernd anstiegen, sondern zwischen-



Figur 14.

durch wieder abfielen. Zur Erklärung wies sie darauf hin, daß die Kurven durch Division zweier Schwächungskurven, nämlich der oberflächlichen T = 0 durch die der betreffenden Tiefe entstanden seien. Der Knick, der übrigens nur in geringer Wassertiefe auftrat, sollte nun einfach von den verschiedenen Krümmungen der erzeugenden Kurven herrühren. Dieser Erklärungsversuch dürfte aber versagen, denn gerade bei Division der Schwächungskurven der Oberfläche und der größter Wassertiefe, deren Krümmungen doch am verschiedensten geartet sind, war die geschilderte Eigentümlichkeit nicht festzustellen.

Bei den hier gefundenen Tiefendosiskurven war von einer Unregelmäßigkeit in dieser Richtung nichts zu bemerken. Die Kurven gleicher Homogenität steigen stets an, und zwar umso stärker, je heterogener das Strahlengemisch ist. In die Sprache der Praxis übersetzt, heißt das:

1. Je niedriger die erzeugende Spannung und je geringer die Filterung einer Röntgenstrahlung ist, umso kleiner ist die mit ihr erzielte Wirkung in einer bestimmten Körpertiefe, umso größer ist aber gleichzeitig die Bedeutung, welche homogenisierenden Einflüssen auf die Veränderung dieser Tiefendosis, und zwar im Sinne einer Erhöhung, zukommt. Wann die Verbesserung der Nutzdosis durch stärkere Filterung und wann durch Spannungserhöhung vorzuziehen sein wird, ist eine Frage der Wirtschaftlichkeit des Betriebes und bildet das Thema mehrerer Arbeiten von Zakovsky (18, 29) und Holzknecht (30).
2. Besonders im Bereiche weicher und mittelharter Röntgenstrahlen genügt die in den Tabellen bisher übliche Charakterisierung der Strahlen durch Angabe der HWS allein nicht. Figur 13 zeigt, wie verschieden die durch ein und dieselbe HWS erzeugte Dosis sein kann.
3. Bei harten Strahlen hat die Veränderung der Qualität keinen bedeutenden Einfluß mehr auf die Größe der Tiefendosis. Durch eine weitere Homogenisierung ist hier kein erheblicher Gewinn zu erwarten.

Zusammenfassung.

Es wurden Untersuchungen angestellt mit dem Ziele, eine Verbesserung in den Angaben der gebräuchlichen Tiefendosistabellen auf Grund einwandfreier Homogenitätsbestimmung zu ermöglichen. Zuvor war eine vollkommene Klärung einiger grundsätzlicher Fragen notwendig. Eine Neubestimmung der Halbwertschichten in Cu, sowie der Holthusenschen und Christenschen Homogenitätsmaße ω und h wurde einleitend vorgenommen und unter Benutzung einer graphischen Darstellung der Beziehungen zwischen HWS, μ und λ_m auf einfache Art durchgeführt. Zwischen ω und h konnte die von Holthusen gefundene eindeutige Beziehung bestätigt und kurvenmäßig aufgezeigt werden.

Die Hauptmessungen wurden am Wasserphantom mit einer neukonstruierten, wellenlängenunabhängigen Kugelkammer von genau geprüften Eigenschaften ausgeführt. Sie dienten der Aufnahme von Schwächungskurven für 100 bis 180 KV und 0 bis 2,0 mm Cu-Filter. Die Auswertung ergab die angefügten Tiefendosistabellen, die für einen FH = 90 cm und ein Einfallsfeld von 75 cm² gelten. Sie basieren auf einer neuen, eindeutigen Charakterisierung des Homogenitätsgrades durch Angabe von h und HWS und zeigen die Verschiedenartigkeit von Dosen, die nach den bisher gebräuchlichen Maßen als gleichwertig angesehen werden mußten. Zur Bestimmung der Oberflächen-Intensität diente erstmalig die Haut-berührende Kammerlage I. Sie erfaßt die Rückstreuung aus dem Körper in ihrer vollen Höhe und dürfte besonders in all den Fällen ein wesentlich richtigeres Bild von der wahren Dosis liefern, wo die Messung der verabfolgten Strahlenmenge vorgenommen wird durch eine Gewebe-aufliegende Kleinkammer, die während der Behandlung mitläuft.

Zu größtem Dank verpflichtet bin ich Herrn Professor Dr. Grebe, weil ohne seine Anregungen, sein immer förderndes Interesse sowie die Überlassung von Arbeitsplatz und Instrumenten die Durchführung der vorliegenden Untersuchungen nicht möglich gewesen wäre.

Schrifttum.

1. Grebe und Nitzge: „Tabellen zur Dosierung der Röntgenstrahlen". Verlag Urban und Schwarzenberg, Berlin 1930.
2. Richtmyer: „The laws of absorption of X-rays". Ph. Rev. Band 18, S. 13.
3. Allen: „The absorption of X-rays of wave-length down to 0,08 A". Ph. Rev. Band 27, Seite 266.
4. Miehlnickel: „Luftionisation durch die von Röntgenstrahlen in luftäquivalenten Stoffen ausgelösten Elektronen". An. Ph. Band 20, Seite 737.
5. Krönig u. Friedrich: „Physikalische und biologische Grundlagen der Strahlentherapie". Verlag Urban und Schwarzenberg, Berlin 1918.
6. Dorneich: „Über die Frage der Verteilung der Röntgenstrahlenintensität im Körper bei Tiefentherapiebestrahlungen". Str. Band 38, Seite 591.
7. Borell: „Experimentelle Untersuchungen zur Tiefendosierung harter Röntgenstrahlen mit besonderer Berücksichtigung der Streustrahlung". Str. Band 14, Seite 239.
8. Dessauer u. Vierheller: „Die Tiefenwirkung der Röntgenstrahlen". Str. Band 12, Seite 655.
9. Eugen Maier: „Experimentelle Untersuchungen über die Intensitätsverteilung der Röntgenstrahlen im menschlichen Körper". Str. Band 21, Seite 480.
10. Glasser und Reitter: „The influence of back-scattering upon the surface dose in roentgen-ray-therapy". Am. J. R. 1926, Band 16, Seite 43.
11. Matthes: „Über die Veränderung der Homogenität und der Tiefendosis einer Röntgenstrahlung gleicher Halbwertschicht". Dissertation Bonn 1935.
12. Behnken und Nitka: „Zur Charakterisierung von technischen Röntgenröhren". Phys. Ztschr. 1935, Band 36, Seite 459.
13. Heinz-Theodor Meyer: „HWS-Messungen in Aluminium". St. Band 38, Seite 329.
14. Holthusen und Braun: „Nochmals zur Frage der Qualitätsmessung". Str. Band 47, Seite 263.
15. Nitka: „Charakterisierung inhomogener Röntgenstrahlen". Phys. Ztschr. 1934, Band 35, Seite 801.
16. Christen: „Messung heterogener Röntgenstrahlen". Fortschr. Band 23, Seite 214.
17. Holthusen und Liechti: D. m. W. 1928, Nr. 37.
18. Zakovsky: „Zur Frage der Verbesserung der Tiefendosis durch Anwendung der optimalen Filterstärke". Fortschr. 1936, Band 54, Seite 301.
19. Braun und Küstner: „Zur Physik der Fingerhutkammer". Str. Band 32, Seite 550.
20. Grunberg und Johner: „Über das Aluminium-Zusatzfilter in der Röntgentherapie". Str. Band 53, Seite 528.

21. Friedrich und Körner: „Experimentelle Untersuchungen über den Einfluß des Röhrenabstandes und der Feldgröße auf den Dosenquotienten". Str. Band 11, Seite 961.
22. Holthusen und Braun: „Grundlagen und Praxis der Röntgenstrahlendosierung". Verlag Thieme, Leipzig 1933.
23. Rajewsky: „Standardisierung in der Röntgenmeßtechnik". Fortschr. Bd. 38, Seite 883.
24. Miehlnickel: „Untersuchungen über den Wirkungsmechanismus der kleinen Ionisationskammer". Str. Band 54, Seite 348.
25. Braun und Küstner: „Zur Physik der Fingerhutkammer". Str. Band 33, Seite 273.
26. Glocker und Kaupp: „Über eine in bezug auf die r-Einheit von der Qualität der Strahlung unabhängige Fingerhutkammer und über die Messung der Streuzusatzdosis im Wasserphantom". Str. Band 23, Seite 447.
27. Lorenz und Rajewsky: „Das Problem der Intensitätsverteilung von Röntgenstrahlen im durchstrahlten Medium". Str. Band 20, Seite 581.
28. von Trossel: „Über eine Fehlerquelle der Röntgendosismessung". Str.-Band 30, Seite 756.
29. Zakovsky: „Tiefenquotienten und Bestrahlungszeiten bei verschiedenen Spannungen und Filtern". Strahlentherapie Band 53, Seite 125.
30. Holzknecht: „Physikalisch-technische Grundlagen der Röntgentherapie". Verlag Springer, Wien 1927.

Anhang.

Tabellen.

Inhalt:

Halbwertschichten in mm Cu,

Der Homogenitätsfaktor ω,

Tiefendosistabellen mit h als Qualitätsmaß für Tiefen von 12,5 bis 150 mm.

Halbwertschichten in mm Kupfer:

	100KV	110KV	120KV	130KV	140KV	150KV	160KV	170KV	180KV	190KV
Cu-Filter:										
0,1 mm	0,20	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35	0,38	0,41	0,44	0,46
0,2 mm	0,27	0,31	0,36	0,40	0,45	0,49	0,52	0,55	0,57	0,59
0,3 mm	0,34	0,39	0,44	0,50	0,55	0,60	0,64	0,66	0,69	0,71
0,4 mm	0,39	0,45	0,51	0,57	0,64	0,70	0,73	0,76	0,79	0,82
0,5 mm	0,44	0,50	0,56	0,64	0,70	0,76	0,81	0,84	0,88	0,92
0,6 mm	0,48	0,54	0,61	0,69	0,76	0,82	0,87	0,91	0,96	0,99
0,7 mm	0,52	0,58	0,65	0,74	0,81	0,87	0,93	0,98	1,04	1,10
0,8 mm	0,55	0,61	0,69	0,78	0,85	0,92	0,98	1,04	1,10	1,17
0,9 mm	0,57	0,65	0,72	0,81	0,88	0,96	1,03	1,09	1,16	1,23
1,0 mm	0,59	0,67	0,75	0,84	0,92	1,00	1,07	1,14	1,23	1,31
1,1 mm	0,61	0,69	0,78	0,87	0,96	1,04	1,12	1,19	1,28	1,37
1,2 mm	0,62	0,71	0,81	0,90	0,99	1,08	1,16	1,24	1,34	1,44
1,3 mm	0,64	0,73	0,83	0,93	1,02	1,12	1,20	1,28	1,39	1,49
1,4 mm	0,66	0,75	0,85	0,95	1,05	1,15	1,24	1,32	1,44	1,56
1,5 mm	0,67	0,77	0,88	0,98	1,08	1,19	1,28	1,37	1,49	1,61
1,6 mm	0,69	0,78	0,90	1,00	1,11	1,22	1,32	1,41	1,53	1,65
1,7 mm	0,70	0,80	0,91	1,03	1,14	1,25	1,35	1,46	1,57	1,68
1,8 mm	0,72	0,82	0,93	1,05	1,17	1,28	1,39	1,50	1,62	1,74
1,9 mm	0,73	0,83	0,95	1,07	1,19	1,32	1,42	1,54	1,66	1,78
2,0 mm	0,74	0,85	0,97	1,10	1,22	1,35	1,46	1,58	1,70	1,83

Der Homogenitätsfaktor ω:

	100KV	110KV	120KV	130KV	140KV	150KV	160KV	170KV	180KV	190KV
Cu-Filter:										
0,1 mm	2,27	2,41	2,52	2,63	2,74	2,84	2,94	3,01	3,15	3,24
0,2 mm	2,02	2,14	2,24	2,34	2,42	2,52	2,62	2,71	2,85	2,96
0,3 mm	1,91	2,00	2,08	2,16	2,25	2,33	2,42	2,52	2,66	2,74
0,4 mm	1,81	1,90	1,97	2,04	2,12	2,20	2,30	2,38	2,52	2,60
0,5 mm	1,73	1,83	1,90	1,96	2,05	2,12	2,20	2,29	2,41	2,48
0,6 mm	1,68	1,78	1,85	1,91	1,98	2,06	2,14	2,22	2,31	2,40
0,7 mm	1,64	1,72	1,79	1,85	1,92	2,01	2,08	2,15	2,24	2,29
0,8 mm	1,60	1,69	1,76	1,81	1,89	1,96	2,04	2,08	2,19	2,23
0,9 mm	1,57	1,65	1,73	1,78	1,86	1,93	1,98	2,04	2,13	2,17
1,0 mm	1,55	1,63	1,70	1,76	1,83	1,89	1,96	2,01	2,08	2,12
1,1 mm	1,54	1,62	1,66	1,74	1,80	1,85	1,91	1,97	2,04	2,08
1,2 mm	1,53	1,59	1,64	1,72	1,77	1,83	1,88	1,93	2,00	2,02
1,3 mm	1,51	1,58	1,63	1,68	1,75	1,79	1,84	1,91	1,97	1,99
1,4 mm	1,49	1,56	1,61	1,67	1,73	1,78	1,83	1,88	1,93	1,94
1,5 mm	1,48	1,55	1,59	1,65	1,71	1,76	1,81	1,85	1,90	1,89
1,6 mm	1,47	1,54	1,58	1,63	1,68	1,73	1,78	1,82	1,87	1,88
1,7 mm	1,46	1,53	1,57	1,61	1,67	1,72	1,77	1,78	1,85	1,88
1,8 mm	1,44	1,51	1,55	1,60	1,65	1,70	1,74	1,77	1,82	1,86
1,9 mm	1,43	1,50	1,54	1,59	1,64	1,67	1,73	1,74	1,81	1,85
2,0 mm	1,43	1,49	1,53	1,57	1,61	1,66	1,69	1,71	1,78	1,83

Tiefendosistabellen

unter Benutzung von h als Qualitätsmaß.

Dosis in 12,5 mm Körpertiefe.

h	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
HWS mm Cu								
0,3	113,1	109,3	103,8	99,4	96,0	91,2	88,0	85,1
0,4	113,5	110,3	106,5	104,0	101,7	98,8	96,3	94,6
0,5	113,9	111,3	108,7	106,8	105,2	103,2	101,6	100,3
0,6	114,2	112,2	110,3	108,8	107,5	106,1	104,9	103,8
0,7	114,6	113,1	111,6	110,4	109,3	108,2	107,0	105,8
0,8	115,0	113,8	112,6	111,6	110,8	109,6	108,3	107,1
0,9	115,3	114,4	113,4	112,6	111,8	110,5	109,2	107,9
1,0	115,6	114,9	114,1	113,5	112,7	111,2	109,8	108,5
1,1	116,0	115,3	114,8	114,1	113,2	111,7	110,3	108,9
1,2	116,4	115,7	115,3	114,6	113,7	112,1	110,6	109,2
1,3	116,7	116,0	115,7	115,0	114,1	112,4	110,9	109,5
1,4	117,0	116,4	116,0	115,3	114,4	112,7	111,1	109,7
1,5	117,4	116,7	116,3	115,6	114,6	113,0	111,3	109,8
Dosis in 20,0 mm Körpertiefe.								
0,3	110,4	107,3	102,0	96,7	92,6	89,3	86,4	83,1
0,4	110,8	108,1	104,4	101,1	98,7	96,7	94,6	92,5
0,5	111,2	108,9	106,4	104,4	102,5	101,1	99,6	98,1
0,6	111,6	109,8	108,0	106,6	105,2	104,0	102,9	101,6
0,7	111,9	110,6	109,3	108,2	107,1	106,0	105,0	103,7
0,8	112,3	111,3	110,3	109,5	108,4	107,2	106,3	105,0
0,9	112,7	111,9	111,1	110,5	109,5	108,1	107,0	105,9
1,0	113,1	112,5	111,8	111,2	110,3	108,8	107,6	106,5
1,1	113,5	113,0	112,3	111,8	110,9	109,4	108,1	107,0
1,2	113,9	113,3	112,8	112,2	111,3	109,8	108,5	107,3
1,3	114,2	113,7	113,2	112,6	111,7	110,2	108,8	107,6
1,4	114,5	114,0	113,5	112,9	112,0	110,4	109,0	107,8
1,5	114,7	114,2	113,7	113,1	112,2	110,6	109,2	108,0
Dosis in 25,0 mm Körpertiefe.								
0,3	106,2	102,7	97,0	91,5	88,2	84,4	82,1	79,1
0,4	106,6	103,6	99,8	97,2	94,7	92,2	90,4	88,2
0,5	107,0	104,5	102,0	100,2	98,8	96,7	95,4	93,9
0,6	107,3	105,4	103,7	102,4	100,7	99,4	98,5	97,3
0,7	107,6	106,2	104,9	103,8	102,5	101,4	100,6	99,5
0,8	108,0	106,9	105,8	105,0	103,8	102,8	102,0	101,0
0,9	108,4	107,6	106,6	106,0	105,0	103,8	103,0	101,9
1,0	108,8	108,2	107,4	106,8	105,8	104,5	103,6	102,4
1,1	109,2	108,5	107,9	107,5	106,4	105,0	104,0	102,7
1,2	109,6	108,9	108,4	107,9	106,9	105,4	104,3	103,0
1,3	109,9	109,2	108,7	108,2	107,2	105,7	104,5	103,2
1,4	110,2	109,5	109,0	108,5	107,4	106,0	104,7	103,4
1,5	110,5	109,6	109,2	108,6	107,5	106,2	104,8	103,5

Dosis in 30,0 mm Körpertiefe.

h	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
HWS mm Cu								
0,3	101,8	98,0	92,0	86,2	83,1	80,2	78,2	75,4
0,4	102,1	99,0	94,7	91,9	89,6	87,7	86,2	84,5
0,5	102,4	99,9	97,0	95,2	93,5	92,2	91,0	89,8
0,6	102,8	100,7	98,9	97,6	96,2	94,9	93,9	92,8
0,7	103,1	101,5	100,2	99,2	98,0	96,8	95,8	94,7
0,8	103,4	102,2	101,3	100,5	99,3	98,1	97,1	96,1
0,9	103,7	102,9	102,1	101,4	100,3	99,0	98,0	97,0
1,0	104,0	103,4	102,7	102,1	101,1	99,8	98,7	97,8
1,1	104,4	103,9	103,3	102,8	101,7	100,4	99,3	98,3
1,2	104,7	104,3	103,7	103,2	102,2	100,8	99,7	98,8
1,3	105,0	104,7	104,1	103,6	102,6	101,2	100,1	99,2
1,4	105,4	105,0	104,4	103,9	102,9	101,5	100,4	99,5
1,5	105,7	105,3	104,6	104,2	103,1	101,7	100,6	99,7

Dosis in 40,0 mm Körpertiefe.

0,3	89,9	87,1	81,2	75,6	73,4	71,3	69,2	67,7
0,4	91,6	88,5	84,5	82,2	80,1	78,5	77,6	76,0
0,5	92,2	89,9	87,2	85,9	84,1	82,8	82,0	80,8
0,6	92,8	91,0	89,3	88,1	86,7	85,6	84,7	83,5
0,7	93,4	92,0	90,7	89,6	88,4	87,3	86,6	85,4
0,8	93,8	92,8	91,6	90,7	89,7	88,5	87,7	86,6
0,9	94,2	93,4	92,4	91,7	90,7	89,5	88,6	87,6
1,0	94,6	93,9	93,0	92,4	91,5	90,2	89,2	88,3
1,1	95,0	94,3	93,6	93,0	92,1	90,8	89,8	88,9
1,2	95,4	94,6	94,0	93,4	92,5	91,2	90,3	89,4
1,3	95,7	95,0	94,4	93,8	92,9	91,6	90,6	89,8
1,4	95,9	95,3	94,7	94,0	93,2	91,9	91,0	90,1
1,5	96,1	95,5	94,9	94,2	93,4	92,2	91,3	90,3

Dosis in 50,0 mm Körpertiefe.

0,3	81,4	77,3	71,1	66,1	63,9	62,2	60,5	58,7
0,4	81,7	78,3	74,1	71,7	69,9	68,6	67,5	66,1
0,5	82,0	79,3	76,5	74,7	73,5	72,6	71,3	70,4
0,6	82,3	80,2	78,3	77,2	76,0	75,1	74,0	73,1
0,7	82,6	81,0	79,7	78,8	77,7	76,7	75,8	74,9
0,8	82,9	81,7	80,7	80,0	78,8	77,8	77,1	76,2
0,9	83,2	82,3	81,5	80,8	79,7	78,7	78,0	77,1
1,0	83,5	82,9	82,1	81,4	80,4	79,4	78,6	77,8
1,1	83,8	83,4	82,7	82,0	81,0	80,0	79,2	78,4
1,2	84,2	83,8	83,1	82,4	81,4	80,5	79,6	78,8
1,3	84,5	84,1	83,5	82,8	81,8	80,9	80,0	79,1
1.4	84,8	84,4	83,7	83,0	82,1	81,2	80,3	79,4
1,5	85,1	84,6	83,9	83,2	82,3	81,5	80,5	79,6

Dosis in 60,0 mm Körpertiefe.

h	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
HWS mm Cu								
0,3	69,9	66,7	60,5	56,2	53,9	52,7	51,6	50,3
0,4	70,3	67,7	63,7	61,1	59,7	58,6	57,6	56,3
0,5	70,7	68,7	66,1	64,5	63,1	62,2	61,3	60,2
0,6	71,1	69,5	67,9	66,7	65,4	64,6	63,6	62,7
0,7	71,5	70,3	69,0	68,2	67,0	66,2	65,2	64,4
0,8	71,9	70,9	69,9	69,2	68,1	67,3	66,4	65,7
0,9	72,4	71,5	70,5	69,9	69,0	68,1	67,4	66,7
1,0	72,8	72,1	71,2	70,5	69,5	68,8	68,1	67,4
1,1	73,2	72,5	71,7	71,0	70,1	69,3	68,7	68,0
1,2	73,4	72,9	72,2	71,4	70,5	69,8	69,1	68,4
1,3	73,7	73,2	72,5	71,7	70,9	70,1	69,4	68,7
1,4	74,0	73,4	72,8	72,0	71,1	70,3	69,6	68,9
1,5	74,2	73,5	73,0	72,2	71,3	70,6	69,8	69,0

Dosis in 70,0 mm Körpertiefe.

0,3	60,6	56,7	50,9	46,5	44,9	43,9	42,8	41,6
0,4	60,8	57,7	53,8	51,4	50,1	49,0	48,1	47,0
0,5	61,0	58,6	56,0	54,7	53,4	52,5	51,6	50,7
0,6	61,2	59,4	57,7	56,9	55,6	54,8	53,9	53,1
0,7	61,5	60,1	59,0	58,3	57,1	56,3	55,5	54,6
0,8	61,9	60,8	59,9	59,1	58,2	57,4	56,6	55,8
0,9	62,2	61,4	60,6	59,9	59,0	58,2	57,4	56,6
1,0	62,6	62,0	61,3	60,5	59,7	58,9	58,1	57,3
1,1	62,9	62,3	61,8	61,0	60,2	59,4	58,6	57,9
1,2	63,2	62,7	62,0	61,4	60,6	59,9	59,1	58,3
1,3	63,6	63,1	62,4	61,7	60,9	60,2	59,4	58,7
1,4	63,9	63,4	62,7	62,0	61,3	60,5	59,7	58,9
1,5	64,2	63,7	63,0	62,2	61,5	60,8	59,9	59,1

Dosis in 80,0 mm Körpertiefe.

0,3	51,5	48,2	42,5	39,0	37,8	36,8	35,8	34,7
0,4	51,9	49,3	45,4	43,4	42,2	41,3	40,4	39,4
0,5	52,3	50,1	47,7	46,2	45,1	44,3	43,6	42,7
0,6	52,8	51,0	49,3	48,1	47,1	46,3	45,7	44,9
0,7	53,1	51,7	50,4	49,4	48,5	47,7	47,1	46,3
0,8	53,4	52,2	51,2	50,4	49,6	48,7	48,0	47,3
0,9	53,6	52,8	51,9	51,3	50,4	49,6	48,7	48,0
1,0	53,9	53,2	52,4	51,9	51,1	50,2	49,3	48,5
1,1	54,2	53,6	52,8	52,3	51,6	50,7	49,8	49,0
1,2	54,4	54,0	53,3	52,7	52,0	51,0	50,1	49,4
1,3	54,7	54,3	53,6	53,0	52,3	51,4	50,5	49,8
1,4	55,0	54,5	53,9	53,3	52,6	51,7	50,9	50,1
1,5	55,2	54,7	54,2	53,5	52,8	51,9	51,1	50,3

Dosis in 90,0 mm Körpertiefe.

h	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
HWS mm Cu								
0,3	44,4	41,2	36,2	33,2	31,7	30,8	30,0	29,0
0,4	44,6	42,0	38,5	36,5	35,3	34,6	33,8	32,9
0,5	44,9	42,7	40,4	39,0	38,0	37,3	36,5	35,7
0,6	45,1	43,4	41,8	40,8	39,9	39,1	38,4	37,7
0,7	45,4	44,1	42,9	42,1	41,1	40,4	39,8	39,0
0,8	45.7	44,6	43,7	43,0	42,1	41,4	40,7	40,0
0,9	46,0	45,1	44,4	43,6	42,8	42,2	41,5	40,8
1,0	46,3	45,7	44,9	44,1	43,4	42,8	42,2	41,5
1,1	46.6	46,1	45,3	44,6	43,9	43,3	42,7	42,0
1,2	46,9	46,4	45,7	44,9	44,3	43,7	43,1	42,4
1,3	47,2	46,7	45,9	45,2	44,6	44,0	43,4	42,7
1,4	47,4	46,9	46,1	45,5	44,9	44,3	33,6	42,9
1,5	47,6	47,1	46,3	45,7	45,2	44,5	43,8	43,1

Dosis in 100 mm Körpertiefe.

0,3	36,4	34,1	31,0	28,1	26,3	25,4	24,5	23,6
0,4	36,9	35,0	32,6	30,8	29,5	28,7	27,8	27,1
0,5	37,4	35,9	34,1	32,8	31,7	30,9	30,2	29,5
0,6	37,9	36,7	35,3	34,3	33,3	32,5	31,9	31,1
0,7	38,4	37,4	36,3	35,4	34,5	33,7	33,2	32,5
0,8	38,8	38,0	37,1	36,3	35,4	34,7	34,2	33,6
0,9	39,2	38,5	37,7	36,9	36,2	35,6	35,0	34,4
1,0	39,6	38,9	38,2	37,5	36,7	36,1	35,6	35,1
1,1	39,9	39,2	38,6	37,9	37,2	36,6	36,2	35,6
1,2	40,2	39,7	38,9	38,2	37,6	37,0	36,6	36,0
1,3	40,4	39,9	39,2	38,6	37,9	37,3	36,8	36,2
1,4	40,7	40,2	39,4	38,8	38,1	37.6	37.0	36,4
1,5	40,9	40,3	39,6	39,0	38,4	37,8	37,2	36,6

Dosis in 110 mm Körpertiefe.

0,3	31,3	29,0	25,9	23,6	22,3	21,6	21,0	20,5
0,4	31,8	30,0	27,5	26,1	25,1	24,5	24,0	23,4
0,5	32,2	30,8	29,0	28,0	27,0	26,5	26,0	25,4
0,6	32.7	31,6	30,2	29,5	28,6	28,0	27,4	26,9
0,7	33,2	32,2	31,2	30,5	29,7	29,1	28,5	28,0
0,8	33,6	32,9	32,0	31,3	30,5	30.0	29,5	29,0
0,9	34,1	33,4	32,6	32,0	31,2	30,8	30,3	29,8
1,0	34,5	33,9	33,2	32,6	31,9	31,4	30,9	30,5
1,1	34,8	34,2	33,6	33,0	32,3	31,8	31,4	31,0
1,2	35,1	34,5	34,0	33,4	32,7	32,1	31,7	31,3
1,3	35,4	34,8	34,2	33,7	33,0	32,4	31,9	31,6
1,4	35,6	35,0	34,4	34,0	33,3	32,7	32,2	31,8
1,5	35,8	35,2	34,6	34,1	33,5	32,9	32,4	31,9

Dosis in 120 mm Körpertiefe.

h	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
HWS mm Cu								
0,3	27,4	25,5	22,6	20,5	19,3	18,6	18,0	17,4
0,4	27,9	26,2	24,0	22,5	21,6	20,9	20,4	19,9
0,5	28,4	26,8	25,2	24,1	23,3	22,6	22,1	21,7
0,6	28,7	27,5	26,2	25,3	24,5	24,0	23,5	23,0
0,7	29,1	28,1	27,0	26,3	25,5	25,0	24,5	24,0
0,8	29,5	28,6	27,7	27,1	26,4	25,8	25,3	24,8
0,9	29,8	29,0	28,2	27,7	27,0	26,4	25,9	25,5
1,0	30,1	29,5	28,6	28,2	27,6	27,0	26,5	26,0
1,1	30,3	29,8	29,1	28,5	28,0	27,4	26,9	26,4
1,2	30,5	30,1	29,4	28,9	28,3	27,8	27,3	26,8
1,3	30,8	30,3	29,6	29,2	28,6	28,1	27,6	27,1
1,4	31,0	30,6	29,8	29,4	28,8	28,3	27,8	27,3
1,5	31,2	30,8	29,9	29,6	29,1	28,6	28,0	27,5

Dosis in 125 mm Körpertiefe.

0,3	25,2	22,8	20,1	18,6	17,8	17,3	16,8	16,3
0,4	25,8	23,9	21,9	20,8	20,0	19,4	18,9	18,4
0,5	26,4	24,8	23,3	22,6	21,6	21,1	20,5	20,0
0,6	26,8	25,6	24,4	23,7	22,9	22,4	21,8	21,3
0,7	27,2	26,2	25,3	24,5	23,9	23,3	22,8	22,3
0,8	27,6	26,7	25,9	25,3	24,7	24,2	23,6	23,1
0,9	28,0	27,1	26,5	26,0	25,4	24,8	24,3	23,8
1,0	28,4	27,6	27,0	26,5	25,8	25,3	24,8	24,3
1,1	28,7	28,0	27,4	26,9	26,3	25,8	25,2	24,8
1,2	29,0	28,3	27,7	27,3	26,6	26,1	25,6	25,2
1,3	29,2	28,6	28,0	27,5	26,9	26,4	25,9	25,5
1,4	29,4	28,8	28,2	27,8	27,2	26,7	26,2	25,7
1,5	29,6	29,0	28,5	28,0	27,4	27,0	26,5	25,9

Dosis in 130 mm Körpertiefe.

0,3	23,6	21,4	18,7	17,2	16,4	15,8	15,2	14,6
0,4	24,0	22,1	20,1	19,2	18,4	17,8	17,2	16,7
0,5	24,4	22,7	21,3	20,7	19,9	19,3	18,8	18,3
0,6	24,7	23,4	22,4	21,6	21,0	20,5	20,0	19,6
0,7	25,0	24,0	23,2	22,5	21,9	21,5	21,0	20,6
0,8	25,3	24,6	23,8	23,1	22,6	22,2	21,7	21,3
0,9	25,7	25,1	24,3	23,7	23,2	22,8	22,3	21,9
1,0	26,0	25,5	24,8	24,1	23,8	23,3	22,8	22,5
1,1	26,3	25,9	25,2	24,6	24,2	23,8	23,3	22,9
1,2	26,6	26,2	25,5	25,0	24,6	24,2	23,7	23,3
1,3	26,9	26,5	25,8	25,3	24,9	24,5	24,0	23,6
1,4	27,2	26,8	26,0	25,6	25,2	24,7	24,3	23,9
1,5	27,4	27,0	26,3	25,8	25,4	25,0	24,5	24,1

Dosis in 140 mm Körpertiefe.

h	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
HWS mm Cu								
0,3	19,8	17,7	15,3	14,4	13,7	13,2	12,6	12,0
0,4	20,2	18,5	17,0	16,2	15,4	14,8	14,4	13,8
0,5	20,6	19,2	18,1	17,4	16,7	16,1	15,7	15,2
0,6	21,0	19,8	18,9	18,3	17,7	17,2	16,8	16,2
0,7	21,3	20,4	19,5	19,0	18,5	18,0	17,6	17,0
0,8	21,7	20,9	20,2	19,6	19,2	18,8	18,3	17,7
0,9	22,0	21,4	20,8	20,2	19,8	19,3	18,9	18,3
1,0	22,4	21,9	21,2	20,7	20,3	19,8	19,4	18,8
1,1	22,7	22,2	21,6	21,1	20,7	20,2	19,8	19,3
1,2	23,0	22,5	21,9	21,4	21,1	20,5	20,1	19,6
1,3	23,2	22,8	22,2	21,7	21,4	20,9	20,4	19,9
1,4	23,4	23,0	22,4	22,0	21,6	21,1	20,7	20,2
1,5	23,6	23,2	22,6	22,2	21,9	21,4	20,9	20,3

Dosis in 150 mm Körpertiefe.

0,3	15,9	14,7	12,9	11,7	11,1	10,8	10,3	9,7
0,4	16,3	15,3	14,0	13,3	12,7	12,3	11,9	11,3
0,5	16,8	15,9	14,9	14,5	13,9	13,4	13,0	12,4
0,6	17,2	16,4	15,7	15,3	14,7	14,2	13,8	13,3
0,7	17,6	17,0	16,3	15,8	15,5	14,9	14,4	13,9
0,8	18,0	17,5	16,9	16,4	16,0	15,4	15,0	14,5
0,9	18,4	17,9	17,4	17,0	16,6	16,0	15,5	15,0
1,0	18,8	18,3	17,8	17,4	17,0	16,4	16,0	15,5
1,1	19,1	18,7	18,2	17,8	17,4	16,8	16,3	15,9
1,2	19,4	19,0	18,5	18,1	17,7	17,2	16,7	16,2
1,3	19,6	19,2	18,8	18,3	17,9	17,5	17,0	16,5
1,4	19,9	19,4	18,9	18,6	18,2	17,7	17,3	16,7
1,5	20,0	19,6	19,1	18,7	18,4	17,9	17,4	16,9

Lebenslauf.

Geboren wurde ich am 22. März 1911 als Sohn Walter der Eheleute Gerhard Lohmann und Käthe, geb. Schwaner in Landonvillers, Kreis Metz. Ich bin Deutscher, arischer Abstammung und evangelischer Konfession. Mein Vater, der in meinem Geburtsort die Stellung eines Rentmeisters innehatte, vertauschte schon im Jahre 1912 diesen Beruf mit dem eines Bergwerksangestellten der Gutehoffnungshütte in Oberhausen (Rheinland), den er heute noch ausübt.

Nach dem Besuch der ersten vier Klassen der Volksschule und neun weiteren Jahren auf der Städtischen Oberrealschule zu Oberhausen bestand ich dort Ostern 1930 die Reifeprüfung.

Anschließend bezog ich die Universität Bonn und hörte zur Vorbereitung auf das höhere Lehramt Vorlesungen aus den Gebieten der Physik, Mathematik, Biologie, Chemie und Geographie, sowie die geforderten kleinen und großen Praktika der Physik und Biologie. In der Mathematik und Geographie benutzte ich die Gelegenheit, um meine Fähigkeiten im technischen Zeichnen auszubilden. Die Teilnahme an großen physikalischen Exkursionen gestattete mir einen Einblick in die Betriebe der Großindustrie. Außerdem beteiligte ich mich an den Arbeiten der Fachschaft und an einer längeren Wehrdienstübung.

Seit Herbst 1935 befaßte ich mich speziell mit der Einarbeit in das Gebiet der Röntgenphysik und widmete mich seit April 1936 ganz der Anfertigung vorliegender Arbeit.

Die mündliche Doktorprüfung fand am 24. November 1937 statt.